

Steffen Marx, Gregor Schacht, Hans-Gerd Maas,  
Robert Koschitzki, Guido Bolle

# **Versuchsgrenzlastindikatoren bei Belastungsversuchen**

F 2806

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2011

ISBN 978-3-8167-8640-5

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

## Versuchsgrenzlastindikatoren bei Belastungsversuchen

Forschungsinitiative ZukunftBau

### Abschlussbericht

Dresden, September 2011

Steffen Marx

Leibniz Universität Hannover, Institut für Massivbau, 30167 Hannover

Gregor Schacht

Technische Universität Dresden, Institut für Massivbau, 01062 Dresden

Hans-Gerd Maas, Robert Koschitzki

Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und

Fernerkundung, 01062 Dresden

Guido Bolle

Hochschule Wismar, Fachbereich Bauingenieurwesen, 23966 Wismar

## **Versuchsgrenzlastindikatoren bei Belastungsversuchen**

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen: SF - 10.08.18.7- 09.7 / II 3 - F20-09-072)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

## Vorwort

Die Zielstellung des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung und Erprobung von speziellen Indikatoren, welche im Zuge einer Probelastung für die sichere Beurteilung der Tragfähigkeit von Massivbaukonstruktionen mit geringem Ankündigungsverhalten geeignet sind. Der Begriff „Ankündigung“ bezieht sich dabei auf die beim Belastungsversuch wichtige Bestimmung der Versuchsgrenzlast, deren Überschreiten zu inakzeptablen Schädigungen führt und daher mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden muss. Durch den Einsatz und vor allem die Kombination moderner Messverfahren kann eine wesentliche Verbesserung der Informationsqualität während des Belastungsversuches erreicht werden. Eine Echtzeitauswertung der Messergebnisse erlaubt die Definition objektiver Kriterien der Versuchsgrenzlast. Dadurch soll zukünftig gewährleistet werden, dass bereits minimales nichtlineares Strukturverhalten unmittelbar während des Versuches festgestellt und damit die Versuchsgrenzlast nahezu schädigungsfrei ermittelt werden kann.

Den Kernpunkt der Sensorik und Datenverarbeitung bilden flexibel einsetzbare photogrammetrische Verfahren zur automatisierten hochgenauen flächenhaften Erfassung von Schädigungen bei Probelastungen aus Bilddaten von Digitalkameras mit permanenter Rechnerverbindung. Durch die Anwendung von speziellen Verfahren der Bildanalyse kann die Auswertung der Bilddaten weitestgehend automatisiert werden und in Echtzeit während des laufenden Versuchs erfolgen. Durch Subpixeloperatoren und geeignete Kalibrierverfahren können Genauigkeiten im Bereich weniger Mikrometer erzielt werden.

Dieser Abschlussbericht gibt einen Überblick über die bisher durchgeführten theoretischen und experimentellen Untersuchungen zur Anpassung und aufgabenspezifischen Entwicklung der gewählten Messverfahren (Photogrammetrie und Schallemissionsanalyse). Diese wurden in Tastversuchen und Schubversuchen an Stahlbetonbauteilen ohne Bügelbewehrung erprobt und erlauben durch die Kombination der Messinformationen Schlussfolgerungen auf eine messbare Vorankündigung auch bei nicht-duktilen Massivbaukonstruktionen.

Für die Fortsetzung des Vorhabens liegt der Schwerpunkt der Forschung in der Weiterentwicklung der identifizierten Vorankündigungsparameter zur praktisch verwendbaren Indikatoren. Insgesamt soll die Praxistauglichkeit der angewendeten Verfahren erreicht werden. Dies betrifft zum einen die zwingende Erfordernis der Online-Ergebnisdarstellung, um eine interaktive Steuerung der Belastungsversuche zu gewährleisten. Zum anderen muss die verwendete Technik einfach und kostengünstig zu applizieren sein. Die Praxistauglichkeit soll in einem Pilotprojekt an einer realen Hochbaukonstruktion nachgewiesen werden.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2. Arbeits- und Zeitplan</b>	<b>4</b>
<b>3. Entwicklung der Experimentellen Tragsicherheitsbewertung</b>	<b>6</b>
3.1. Geschichtliche Entwicklung . . . . .	6
3.1.1. Die ursprüngliche Bedeutung des Belastungsversuches . . . . .	6
3.1.2. Probelastung von Brücken als Nachweis der Tragsicherheit . . . . .	7
3.1.3. Die Bedeutung von Probelastungen in der Entwicklung des Eisenbetonbaus . . . . .	9
3.1.4. Entwicklung von Richtlinien und Normen . . . . .	12
3.1.5. Theoretische und praktische Weiterentwicklung in der jüngeren Vergangenheit . . . . .	14
3.2. Aktuelle Praxis . . . . .	16
3.3. Bekannte Versuchsgrenzlastindikatoren . . . . .	19
<b>4. Schubbruchgefahr von bestehenden Stahlbetonbauteilen</b>	<b>25</b>
4.1. Schubprobleme im Stahlbetonbau . . . . .	25
4.2. Einflussfaktoren auf das Schubtragverhalten von Bauteilen ohne Schubbewehrung . . . . .	30
4.2.1. Schubslankheit . . . . .	30
4.2.2. Längsbewehrung . . . . .	31
4.2.3. Verbundverhalten . . . . .	37
4.2.4. Art der Belastung . . . . .	44
4.2.5. weitere Einflussfaktoren . . . . .	47
4.3. Beurteilung des Schubtragverhaltens im Belastungsversuch . . . . .	48
4.3.1. Vorbemerkungen . . . . .	48
4.3.2. Stahlbetonbalken ohne Schubbewehrung im Zustand II . . . . .	48
4.3.3. Bügelbewehrte Stahlbetonbalken im Zustand II . . . . .	50
<b>5. Bewertung des Tragwerkszustandes im Belastungsversuch</b>	<b>52</b>
5.1. Vorankündigung des Versagens von Stahlbetonbauteilen . . . . .	52
5.2. Wann ist der Riss ein Riss? - Die Vorankündigung als Problem des Betrachtungsmaßstabs . . . . .	57
5.3. Entwicklung von Kriterien und Indikatoren zur Beurteilung der Schubbruchgefährdung . . . . .	69

---

<b>6. Ausgewählte Messverfahren</b>	<b>73</b>
6.1. Photogrammetrie . . . . .	73
6.1.1. Grundlagen der Photogrammetrie . . . . .	73
6.1.2. Messverfahren im bautechnischen Mess- und Versuchswesen . . . . .	75
6.1.3. Einsatz der Photogrammetrie zur Bestimmung von Versuchsgrenzlastindikatoren . . . . .	81
6.2. Schallemission . . . . .	86
6.2.1. Grundlagen der Schallemissionsanalyse . . . . .	86
6.2.2. Anwendung der Schallemissionsanalyse im bautechnischen Mess- und Versuchswesen . . . . .	88
6.2.3. Einsatz der SEA zur Bestimmung von Versuchsgrenzlastindikatoren	88
<b>7. Laboruntersuchungen an Stahlbetonbauteilen</b>	<b>91</b>
7.1. Tastversuche . . . . .	91
7.1.1. Planung . . . . .	91
7.1.2. Durchführung . . . . .	93
7.1.3. Versuchsergebnisse . . . . .	96
7.2. Versuche an querkraftunbewehrten Stahlbetonbauteilen . . . . .	100
7.2.1. Planung . . . . .	100
7.2.2. Durchführung . . . . .	102
7.2.3. Versuchsergebnisse . . . . .	103
7.2.4. Vergleich der Messergebnisse für Balken 1, Feld 1 . . . . .	106
7.2.5. Vergleich der Messergebnisse für Balken 1, Feld 2 . . . . .	111
7.2.6. Vergleich der Messergebnisse für Balken 2, Feld 1 . . . . .	113
7.2.7. Vergleich der Messergebnisse für Balken 2, Feld 2 . . . . .	118
7.2.8. Zusammenfassung . . . . .	122
<b>8. Bewertung des Tragwerkszustandes von Spannbetonbauteilen</b>	<b>123</b>
8.1. Problemanalyse und Zielstellung . . . . .	123
8.2. Messtechnische Möglichkeiten zur Ermittlung der Vorspannkraft . . . . .	124
<b>9. Laboruntersuchungen an Spannbetonbauteilen</b>	<b>128</b>
9.1. Versuchsziel und Aufgabenstellung . . . . .	128
9.2. Versuchsobjekte . . . . .	128
9.3. Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung . . . . .	129
9.4. Versuchsergebnisse . . . . .	133
9.4.1. Balken 1 . . . . .	133

---

<b>10. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>139</b>
<b>11. Veröffentlichungen</b>	<b>141</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>143</b>
A.1. Darstellung der Messergebnisse für Versuch B1F1 . . . . .	143
A.1.1. Herkömmliche Messtechnik . . . . .	143
A.1.2. Schallemissionsanalyse . . . . .	144
A.1.3. Photogrammetrie . . . . .	147
A.2. Darstellung der Messergebnisse für Versuch B1F2 . . . . .	149
A.2.1. Herkömmliche Messtechnik . . . . .	149
A.2.2. Schallemissionsanalyse . . . . .	150
A.2.3. Photogrammetrie . . . . .	153
A.3. Darstellung der Messergebnisse für Versuch B2F1 . . . . .	155
A.3.1. Herkömmliche Messtechnik . . . . .	155
A.3.2. Schallemissionsanalyse . . . . .	156
A.3.3. Photogrammetrie . . . . .	159
A.4. Darstellung der Messergebnisse für Versuch B2F2 . . . . .	161
A.4.1. Herkömmliche Messtechnik . . . . .	161
A.4.2. Schallemissionsanalyse . . . . .	162
A.4.3. Photogrammetrie . . . . .	165
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>167</b>